

ДИСТАНЦИОННАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОДУКТИВНОСТИ МЕТАНОВЫХ СИПОВ НА МОРСКОМ ДНЕ ПО ФЛУКТУАЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЭХО-СИГНАЛОВ: ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

А. А. ЛЮБИЦКИЙ, А. В. УЗЛЕНКОВ, А. И. ЛОМЕЙКО, Н. Д. БЕРЕЖНАЯ

Институт радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины, Харьков

Представлены аппаратурно-методическое обеспечение и результаты лабораторных экспериментальных исследований по верификации акустического метода определения продуктивности газовых сипов на основе измерений параметров вероятностного распределения флуктуаций эхо-сигналов от газового факела. Дано описание лабораторной экспериментальной установки. Проведено прямое сравнение числа пузырьков газа в элементе разрешения сонара, полученных по данным акустических и оптических измерений, подтверждающее возможность практической реализации метода.

ВВЕДЕНИЕ

Продуктивность газовыделяющих источников (сипов) является одним из основных параметров для оценки объемов газоотдачи и потоков метана от морского дна, который зависит от частоты поступления пузырьков в водный столб и численно равен их количеству в тонком придонном слое газового факела (ГФ) над сипом. В рамках методологий одночастотного акустического зондирования ГФ, получивших наибольшее распространение, прямой подсчет пузырьков, как правило, не представляется возможным из-за отсутствия условий разрешения сонаром отдельных пузырьков в ГФ, дающих основной вклад в газоотдачу дна [1]. Это приводит к необходимости проведения сопутствующих «реперных» измерений продуктивности сипов и потоков метана независимыми методами (оптические методы, газовые ловушки и др.) [2,3]. Постановка таких измерений в условиях больших глубин является сложной проблемой и требует больших затрат времени и средств.

В работе [4] развит альтернативный метод определения продуктивности метановых сипов, основанный на измерении коэффициента эксцесса мгновенных значений эхо-сигналов от ГФ при конечном (относительно небольшом) числе пузырьков газа в элементе разрешения акустической системы. Для выяснения возможности практической реализации метода целесообразна постановка экспериментальных исследований в контролируемых лабораторных условиях, позволяющих проводить прямой подсчет среднего количества пузырьков в элементе разрешения сонара с использованием оптических средств и его сравнение с данными акустических измерений. В настоящей работе дано описание аппаратурно-методического обеспечения и представлены результаты таких экспериментов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты выполнены на лабораторной установке, основу которой составляет резервуар из оргстекла, заполненный фильтрованной водопроводной водой. На резервуаре смонтированы излучатель сонара на подъемном устройстве и донная система инъекции одиночных воздушных пузырьков и газовых факелов (ГФ). Средства

оптической регистрации, благодаря прозрачным стенкам и дну резервуара, расположены снаружи и включают стробоскопическую систему подсвета факела, средства оптической регистрации (фото-, WEB- камеры, персональный компьютер) и лазерный имитатор оси диаграммы направленности (ДН) антенны сонара.

Схема и внешний вид установки, (кроме средств регистрации и имитатора оси ДН) представлены на рис. 1, где показаны резервуар (1), излучатель сонара (2) с элементами согласования (3) и механизмом подъема (4), донный инжектор одиночных пузырьков и ГФ (6), воздушный компрессор и ресивер (7), средства оптической регистрации (8), экран с окном (9), импульсный источник света (10), вентиль-дозатор инжектора ГФ (12) и приемо-передатчик сонара (13).

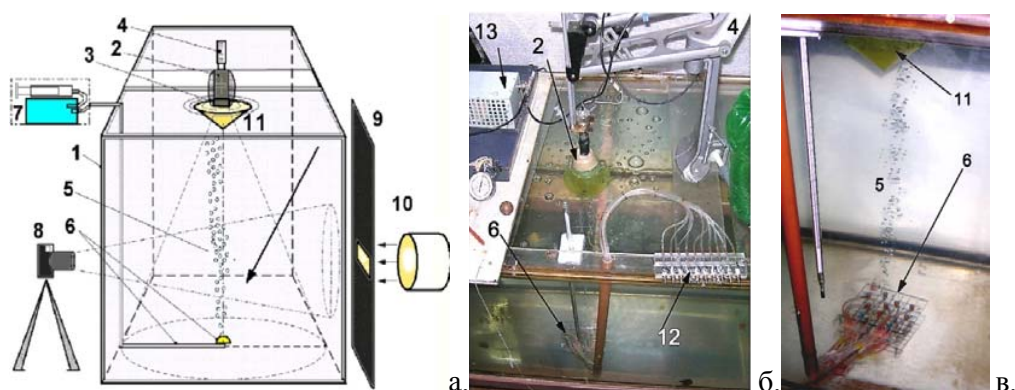


Рис. 1.

Табл. 1

Параметр	Единица измерения	Величина
Несущая частота сонара	кГц	78,0
Излучаемая мощность	Вт	3,2
Ширина диаграммы излучателя	Град	28
Длительность импульсов / число периодов / разрешение по дальности	сек / число периодов / м	$64 \cdot 10^{-6} / 5 / 0.047$
		$102 \cdot 10^{-6} / 8 / 0.075$
Длина волны сонара в воде	мм	18.8
Частота повторения импульсов	Гц	5...10
Частота АЦП приемника	МГц	1
Динамический диапазон системы регистрации, не менее	дБ	48
Размеры водного резервуара, глубина, длина, ширина	м, м, м	0.6, 0.65, 1.65
Расстояние от излучателя до дна	М	0.655
Радиусы генерируемых пузырьков	Мм	0.53, 1.52, 2.36, 3.05, 4.63, 6.2, 7.8, 10, 10.6, 13.3
Число каналов в инжекторе факела	шт.	10

При калибровке сонара были оценены акустический потенциал сонара, параметры и положение ДН относительно геометрической оси излучателя. Дистанционная зависимость потерь на распространение на рабочей глубине соответствовала дальней зоне. В ходе измерений расположение ГФ и одиночных пузырьков в луче сонара контролировалось лазерным имитатором оси ДН, установленным под дном резервуара.

Определение количества пузырьков в элементе разрешения обеспечивалось путем импульсного подсвета факела и видеозаписи пузырьков системой стробирования и оптической регистрации, показанной на рис. 2.

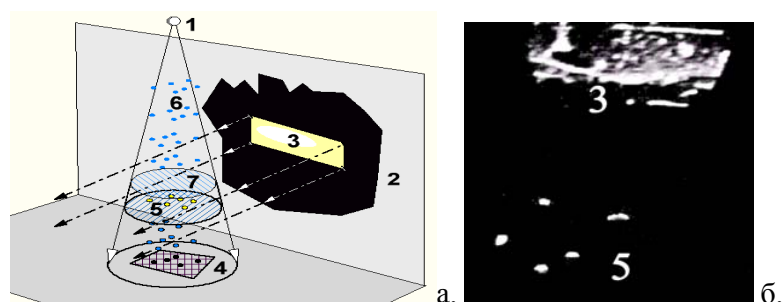


Рис. 2. Стробирование факела: а. – оптическая схема, б. - пример записи WEB-камеры.

На рис. 2 показаны: излучатель сонара (1), маска с отверстием (2), коллиматор светового потока (3), 10-ти канальный инжектор ГФ (4), подсвеченные пузырьки в элементе разрешения (5), пузырьки вне элемента разрешения (6), разрешаемый объем (7).

Вертикальный размер элемента разрешения 7 при длительности импульса 64 мкс, составлял 47 мм, чему соответствовала и высота отверстия в маске. При максимальной ширине факела не более 100 мм ширина отверстия в маске составляла 120 мм, что обеспечивало равномерную засветку пузырьков ГФ. Световой поток формировался с помощью четырех 10-ваттных светодиодов и линзового коллиматора, освещающая ГФ на время действия строб-импульса подсвета.

На рис. 3 показаны примеры эхограмм одиночного пузырька (а), 10-ти канального ГФ (б) и эталонной сферы, совмещенной с осциллограммой строб-импульса (в).

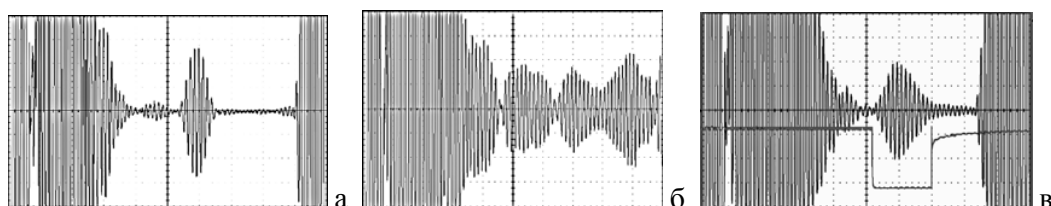


Рис. 3.

Настройка системы стробирования заключалась в совмещении временного положения строб-импульса с эхо-сигналом от эталонной сферы, установленной в заданный элемент разрешения. Длительность строб-импульса с учетом требуемой экспозиции и характерных скоростей всплытия пузырьков составляла 200 мкс.

Во время эксперимента осуществлялась непрерывная видеозапись ГФ WEB-камерой в черно-белом режиме с повышенной контрастностью в темноте для улучшения отношения сигнал/фон. Сонар и система стробирования запускались от общего генератора. При частоте повторения импульсов сонара 9 Гц и стандартной частоте видеозаписи 25 кадров/с практически каждая эхограмма была обеспечена видео данными.

В ходе эксперимента были выполнены записи эхо-сигналов от одиночных пузырьков с эквивалентными радиусами от 0,53 до 13,3 мм (см. Табл. 1), и от ГФ, содержащих 5 и 10 газовых струй. В резервуаре контролировались основные гидрофизические параметры: температура воды, скорость звука в воде, поверхностное натяжение и кинематическая вязкость воды, которые в эксперименте составляли: 14.5°C, 1470±2 м/с, 0.073 н/м, и 1.171·10⁻⁶ м²/с, соответственно.

Обработка акустических данных включала компенсацию когерентного фона, учет потерь на распространение, расчеты гистограмм вероятностных распределений эхо-сигналов, их моментов и параметров - математического ожидания (МО), дисперсии (Disp), коэффициентов вариации (C VAR), эксцесса и асимметрии.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основой для определения продуктивности газовых сипов является инверсионное соотношение, связывающее среднее число пузырьков газа $\langle n \rangle$ в элементе разрешения сонара с коэффициентом эксцесса γ_3 мгновенных значений эхо-сигнала от пузырькового факела над сипом [4]:

$$\langle n \rangle = AC / \gamma_3,$$

в котором коэффициент γ_3 должен быть измерен, а параметр $A = \langle a^4 \rangle / \langle a^2 \rangle^2$ и параметр C (зависящий от вида зондирующего сигнала) – рассчитаны. Для тонально-импульсных зондирующих сигналов с прямоугольной огибающей параметр $C=1,5$. Расчет параметра A требует сведений о вероятностных распределениях случайных амплитуд a элементарных эхо-сигналов от пузырьков, формирующих факел. Учитывая отсутствие в литературе таких сведений, первоочередной задачей экспериментов являлось исследование амплитудных характеристик обратного рассеяния от одиночных пузырьков.

На рис.4 приведены гистограммы распределений амплитуд эхо-сигналов от всплывающих пузырьков в порядке возрастания их размеров (а), а также средние значения, дисперсии и коэффициенты вариации амплитудных флуктуаций (б). Массивы исходных данных для пузырьков каждого размера включали в себя амплитуды эхо-сигналов, попавших в выбранный строб дальности (см. рис. 3а,в) с последующим их приведением к фиксированной дальности 0,47 м. Объемы выборок при расчетах гистограмм составляли 1897–2374 отсчета.

Анализируя приведенные на рис. 4 данные, отметим следующее. С увеличением эквивалентного радиуса пузырьков $r = (3V/4\pi)^{1/3}$ (здесь V – объем пузырька) от 1,52 до 13,3 мм средние значения амплитуды эхо-сигналов соответственно возрастают, что отражает известную зависимость рассеивающей способности газовых пузырьков от их размера. При этом имеет место расширение гистограмм (увеличение дисперсии) и рост коэффициента вариации амплитудных флуктуаций, наиболее выраженные для «эллипсоидальных» пузырьков, для которых характерны сильные осцилляции формы и траектории движения при всплытии. Вероятностные распределения амплитуды эхо-сигналов от крупных пузырьков с $r \geq 4,63$ мм близки к рэлеевскому, тогда как для более мелких пузырьков наблюдается снижение коэффициентов асимметрии с уменьшением их размера и тенденция к нормализации распределений.

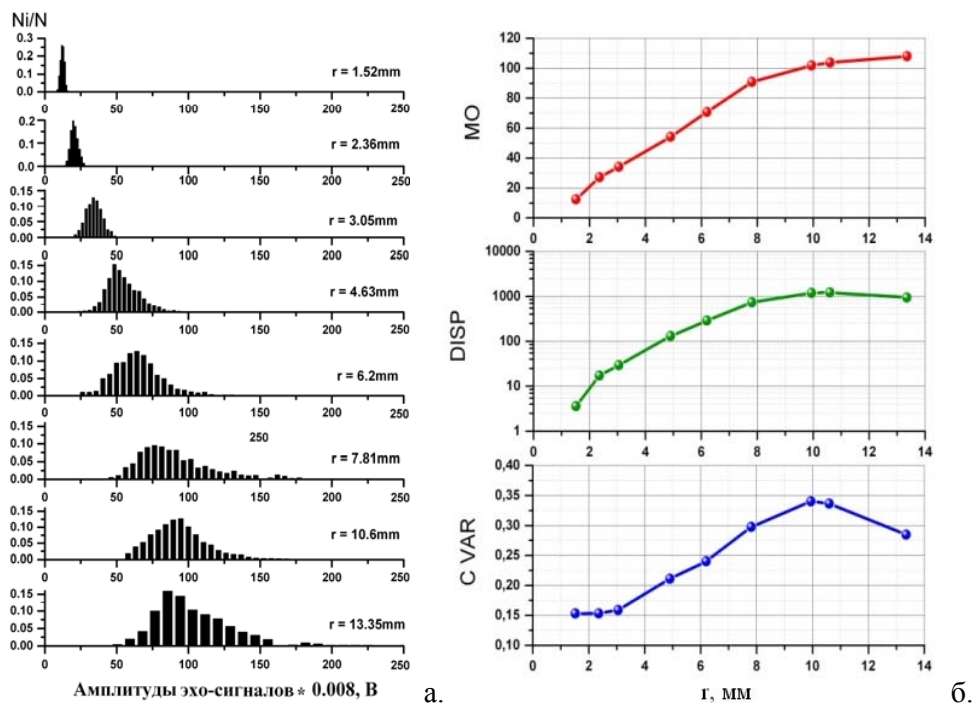


Рис. 4.

Второй этап лабораторных экспериментов посвящен исследованию статистических характеристик эхо-сигналов от пузырьковых факелов и определению коэффициентов эксцесса, необходимых для оценок продуктивности газовых сипов. С помощью многоканального инжектора, описанного выше, генерировались 5-ти и 10-ти струйные факелы, содержащие пузырьки с колоколообразным (близким к гауссову) распределением по размерам со средним значением $r_{\text{ср}} = 4,6$ мм и среднеквадратичным отклонением 0,42 мм. Скорости всплытия пузырьков $v_{\text{п}}$ составляли 22,3-26 см/с и соответствовали известной зависимости $v_{\text{п}}(r)$ для водопроводной воды [5].

Пример записи эхо-сигнала (эхограмма) от 10-струйного факела показан на рис.3.б. Для статистической обработки акустических данных отбирались только те эхограммы, которые сопровождалась видеозаписью пузырьков, позволяющей однозначно определять их количество в заданном элементе разрешения сонара (см. рис. 2б). По отобраным видеообразам, определялось число пузырьков в элементе разрешения и вычислялось их среднее - $\langle n_p \rangle$ при данной инжектора ГФ.

На рис. 5. приведены гистограммы плотности вероятности эхо-сигналов S от 5-ти и 10-ти струйного факелов и соответствующие нормальные законы распределений (сплошные линии). Для удобства сравнения их аргументы нормированы на среднеквадратичные значения σ_s . Гистограммы получены по выборкам из 1944 и 1893 мгновенных значений эхо-сигнала от пузырьков в элементе разрешения, контролируемом оптическими методами.

Расчеты коэффициентов эксцесса дали значения $\gamma_{\text{э}1} = 1.45$ и $\gamma_{\text{э}2} = 0.76$ для 5-ти и для 10-ти струйного ГФ, соответственно. При этом, по данным видеосъемки среднее количество пузырьков в элементе разрешения составило $\langle n_{\text{э}1} \rangle = 4,8$ для 5-ти струйного ГФ и $\langle n_{\text{э}2} \rangle = 8,2$ для 10-ти струйного.

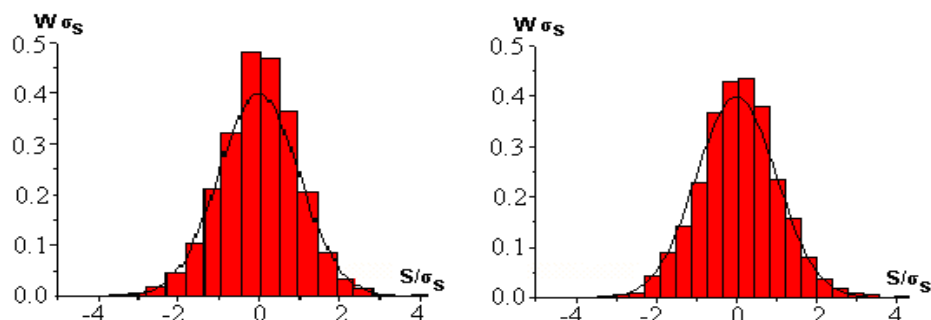


Рис. 5.

На рис.6 результаты вышеописанных экспериментов представлены на плоскости $(\gamma, \langle n \rangle)$ крестиками с координатами $(\gamma_{э1}, \langle n_{э1} \rangle)$ и $(\gamma_{э2}, \langle n_{э2} \rangle)$. Здесь же приведена теоретическая зависимость коэффициента эксцесса от среднего числа пузырьков в элементе разрешения применительно к условиям экспериментов.

Сравнение экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов свидетельствует об удовлетворительном их соответствии.

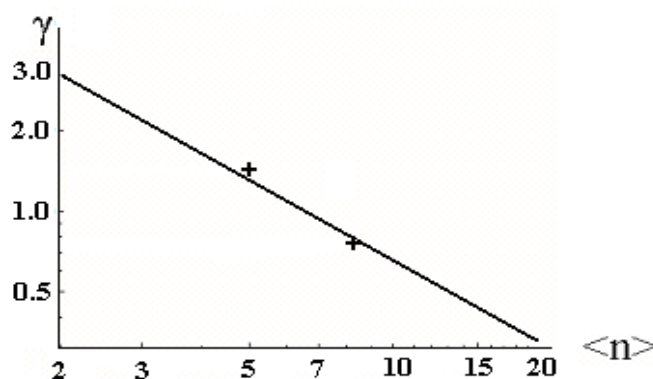


Рис. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты модельных экспериментов в лабораторных условиях подтверждают возможность практической реализации акустического метода дистанционной оценки продуктивности газовых сипов по флуктуационным характеристикам эхо-сигналов и дают основу для его дальнейшего развития

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров, В.Н., Артемов Ю. Г., Гулин С. Б. Метановые сипы в Черном море.– Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011.– 407 с.
2. Weber T. S., Mayer L., Jerram K., Beadoin J., Rzhанov Y. and Lovando D. Acoustic estimates of methane gas flux from the sea bed in a 6000 km² region in the Northern Gulf of Mexico // *Geochem. Geophys. Geosyst.*– 2014.– **15**.– P. 1911–1925.

3. Veloso M., Greinert J., Mienert J., De Batist M. A new methodology for quantifying bubble flow rates in deep water using splitbeam echosounders : examples from the Arctic offshore NW-Svalbard // *Limnol. Oceanogr: Methods*.– 2015.– **13**(6).– P. 267–287.
4. Любицкий А. А, Омельченко А. В. Дистанционная акустическая диагностика продуктивности метановых сипов на морском дне по флуктуационным характеристикам эхо-сигналов: Методология // Сборник трудов акустического симпозиума «Консонанс-2017».– Киев: Институт гидромеханики НАНУ, 2017. – С. 000–000.
5. Haberman W. L., Morton R. K. An experimental study of bubbles moving in liquids // *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*– 1954.– **80**.– P. 368–427.